水稻精準農耕之氮營養遙感探測技術

申雍*[1]、李裕娟[2]、章國威[1]、羅正宗[3]、姚銘輝[4]、陳仁炫[1]
[1]國立中興大學土壤環境科學系
[2]行政院農業委員會農業試驗所農藝組
[3]行政院農業委員農業試驗所嘉義分所農藝組
[4]行政院農業委員農業試驗所農工組
E-mail: yshen@nchu.edu.tw

摘要 ---------- 74
一、前言 ---------- 74
二、稻株氮營養遙測模式之建立與測試 ---------- 75
三、簡易高光譜影像系統之研發與應用 ---------- 77
四、手持式稻株感應器之研發與應用 ---------- 78
五、結語 ---------- 79
六、誌謝 ---------- 79
七、引用文獻 ---------- 79
ABSTRACT ---------- 80

水稻精準農耕之氮營養遙感探測技術

申雍*[1]、李裕娟[2]、章國威[1]、羅正宗[3]、姚銘輝[4]、陳仁炫[1]
[1]國立中興大學土壤環境科學系
[2]行政院農業委員會農業試驗所農藝組
[3]行政院農業委員農業試驗所嘉義分所農藝組
[4]行政院農業委員農業試驗所農工組
E-mail: yshen@nchu.edu.tw

摘要

水稻是臺灣地區栽培面積最廣的糧食作物，而氮肥是提高和穩定水稻生產最重要的肥料，但是在水稻生育初期很難以目視方法判別稻株的氮營養狀況，利用遙感探測技術可以提供田間稻株氮營養狀況空間分佈的資訊，是實施水稻精準農耕管理的基礎。「稻株氮營養狀況偵測技術與應用」細部計畫在「水稻精準農業(耕)體系之研究」中，負責利用遙感探測技術提供田間稻株氮營養狀況的空間分佈資訊。在爲期四年之研究中，本計畫由測定水稻植被反射光譜的基礎工作出發，首先確認 $dR/d\lambda|_{735}$ 除可以分辨稻株體內氮素的濃度外，也具有可區別田間稻株氮營養狀況空間分佈的能力。進而利用 $dR/d\lambda|_{735}$ 建立稻株氮營養遙測模式，並於臺北、臺中、嘉義、屏東等地進行不同地區多年期之田間驗證，測試結果均指出所建立的稻株氮營養遙測模式可以快速鑑別田間穗肥施用期間稻株的氮營養狀態，足以提供做爲田間穗肥精準施用的依據。爲能將該遙測模式實際應用於獲取田間稻株氮營養之空間分佈圖，本計畫同時開發出一套簡易高光譜影像拍攝系統，可依田間作業需求掛載於高空作業車或直昇機上。實際測試結果指出，此套簡易高光譜影像拍攝系統已達到實用的程度，可適時提供水稻穗肥精準施用所需之田間稻株氮營養空間分佈圖。本計畫也另行研發手持式的稻株氮營養狀況感應器一套，能立即獲知測定地點水稻的氮營養狀況，除可用於田間氮營養狀況空間分佈調查外，還可與目前之人工施肥作業結合組成實用的穗肥精準施用系統。

關鍵詞：水稻(*Oryza sativa* L.)、氮素、植被指數、高光譜影像、波段濾鏡、精準農業。

一、前言

氮肥是提高和穩定水稻生產最重要的肥料，但也是最不容易正確施用的肥料，因爲即使水稻在生育期中吸收等量的氮素，但由於吸收的時期不同，稻株的型態和產量構成要素常常不同，產量也隨之變動。爲能控制水稻氮肥之供給，目前的肥培管理雖已將水稻氮肥分成基肥、2-3 次的追肥和穗肥施用，但仍多憑農

民個人之經驗決定施肥的時間與用量，尚不能達到依稻株體內氮營養狀況而施用的精準管理。由於水稻是臺灣地區栽培面積最廣的作物，若能採用精準的肥培管理，適時適量的施用氮肥，除了具有提高稻作產量和施肥的經濟效益外，更可以減少非點源的污染，也具有維護生態環境的積極意義。

爲能及時偵測田間稻株的氮營養狀態，並提供田間稻株氮營養狀態之空間分佈圖，俾能達成精準施用氮肥之目標，因此於「水稻精準農業(耕)體系之研究」專案科技計畫中，設置「稻株氮營養狀況偵測技術與應用」細部計畫，爲屬於「水稻生育狀態與環境監測系統」下四個子計畫之一。「稻株氮營養狀況偵測技術與應用」細部計畫所設定的研發目標爲(1)監測穗肥施用時期水稻植被反射光譜和相對應之稻株的氮營養狀態，建構可迅速檢測稻株氮營養狀況的遙測模式，(2)開發可搭載於不同遙測載台(手持、高空作業車、直昇機)之感測系統，希望以前瞻性的眼光，致力於研究與發展偵測田間稻株的氮營養狀態所需之關鍵知識、技術與組(元)件，俾利進行田間稻株氮營養狀況空間分佈調查，提供作爲穗肥精準施用管理之依據。以下乃將該計畫四年來的研究成果作一綜合整理，說明本子計畫已獲得之成果。

二、稻株氮營養遙測模式之建立與測試

遙測技術主要利用植被的反射光譜間接推測作物的生育性狀，必須有適當的遙測模式才能將植被的反射光譜資訊轉化成所需的物理量。因此，欲瞭解稻株體內的氮營養狀態，首先必須獲得稻株氮營養狀態由充分至缺乏狀態下的植被反射光譜地眞資訊，並配合植體化學分析結果，才能將植被反射光譜中的細微變化，經由統計分析的步驟，逐步歸納建立適用的稻株氮營養遙測模式。所以研究開始之初，就先在農委會農業試驗所之水稻精準試驗田區和農業試驗所嘉義分所之溪口試驗農場，設立以不同氮肥施用量處理的水稻樣區，定期利用可攜式光譜儀量測不同氮營養狀況下水稻植被的反射光譜，並據以建立所需的遙測模式。此類地眞光譜的測定工作，在四年研究期間一直持續進行，以累積受不同年期氣候環境條件影響之水稻植被反射光譜的可能變化範圍，俾供作爲修正遙測模式參數使用。

不同氮肥處理水稻植被之典型反射光譜示於圖 1，反射光譜在可見光段非常接近，因此在田間通常不易以目視方法區別稻株的氮營養狀況；近紅外光段的反射值則隨氮肥用量之增加而升高，此與氮肥供應充足之水稻試區，其分蘖數和葉面積都顯著增加有關。因此，氮肥處理效應將使得水稻植被反射光譜在紅光段和近紅外光段的反射值差距增大，進而導致紅光段與近紅外光段地帶的斜率變化加劇(申等，2000)。

在建立稻株氮營養遙測模式之初，曾先對多種光譜特徵測試其作爲模式參數的可能性，結果指出稻株體內之氮營養狀況可利用植被指數 SRVI、NDVI、和一次微分值 $dR/d\lambda|_{735}$ 等特徵值進行鑑別(表 1)，但是 SRVI 和 NDVI 只能區別稻株體內氮素是否嚴重缺乏，$dR/d\lambda|_{735}$ 則可以分辨稻株體內氮素的濃度。由於農民栽培水稻都會施用肥料，因此採用精準農耕時所需的稻株氮營養鑑別技術必須能區別施肥處理間的差異。在各種鑑別方法中，僅有一次微分的值可以突顯出不同處理間的差異；此外，一次微分也具有去除土壤背景反射干擾之功能，因此選用 $dR/d\lambda|_{735}$ 作爲鑑別稻株體內氮營養狀況的特徵值以開發相關的遙測模式(申等，2000)。經多年之測試與修正(申等，2001；李等，2002)，式(1)爲目前所使用之稻株氮營養遙測模式。

$$N\% = 0.151 + 187.82\ dR/d\lambda|_{735} \tag{1}$$

Table 1. Comparisons of characteristic indices to identify nitrogen status of rice plants applied at different rates (kg N ha^{-1}) of nitrogen fertilizer. (from Shen, *et al.* 2000)

	3 week			6 week			9 week		
	0	90	180	0	90	180	0	90	180
Indices									
SRVI	2.6	8.0	8.2	5.8	10.3	10.2	6.6	12.0	12.5
NDVI	0.44	0.78	0.78	0.71	0.82	0.82	0.74	0.85	0.85
$dR/d\lambda^{a}\|_{735}$	1.43	3.78	4.16	3.53	5.96	6.01	3.90	5.26	6.69
Distribution									
SRVI	31	97	100	57	100	100	53	96	100
NDVI	56	99	100	86	100	100	86	100	100
$dR/d\lambda\|_{735}$	34	91	100	59	99	100	58	79	100

a: $dR/d\lambda|_{735}$ ×1E3

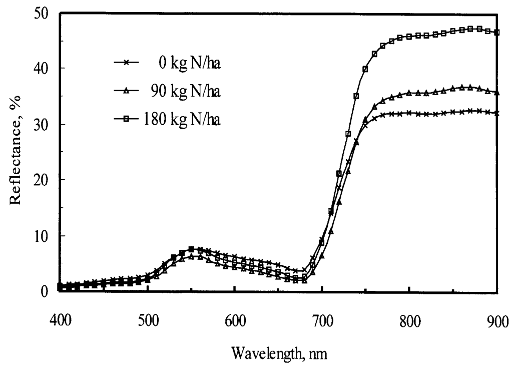

Fig 1. Typical reflectance spectrum of rice canopies at different nitrogen fertilizer application rate. (from Shen *et al.*, 2000)

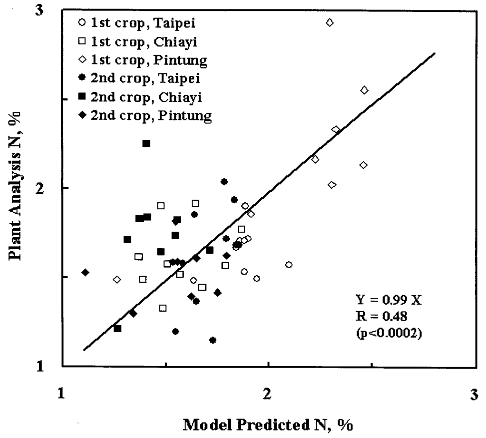

Fig 2. Results of validation tests conducted in 2002 at 3 sites for evaluating the remote sensing model to detect nitrogen status within rice plants.

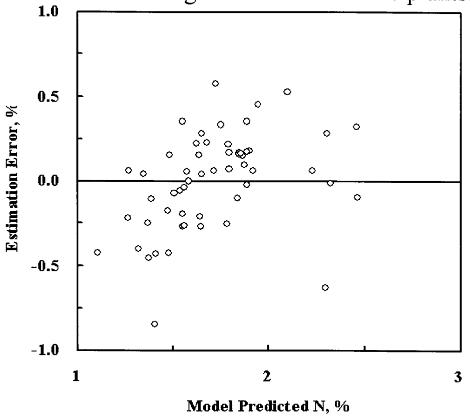

Fig 3. Residue analysis of the remote sensing model to detect nitrogen status within rice plants.

爲驗證該模式在不同年期與地區的適用性，2002 年一、二期作則於臺北、嘉義和屏東三地區同時進行不等量氮肥處理試驗。驗證結果指出，由遙測模式所推估之稻株體內氮濃度與相對應之植體化學分析值，均呈現 1:1 的線性相關與分佈(圖 2)，顯示所研發之稻株氮營養狀況遙測模式具有適用於不同地點、不同年期、與不同期作的能力。殘差分析則顯示利用遙測模式推估植體氮濃度的準確度應在±0.5%以內(圖 3)。至此，可以確認該模式已達實用之階段。

三、簡易高光譜影像系統之研發與應用

遙測模式建立後，仍需仰賴適當的遙感探測系統獲取所需的遙測影像，才能轉換成田間稻株氮營養狀態之空間分佈圖，俾供「水稻精準農業(耕)體系之研究」專案計劃下「水稻栽培與環境精準管理專家決策系統」做出對應之網格決策圖，再交由「精準農業自動化農機操作系統」實施精準的施肥操作。

本研究所研發之模式需使用 730nm 和 740nm 的遙測影像，計算每一像元之一次微分值 $dR/d\lambda|_{735}$ 後，才能換算成該像元稻株的氮營養狀態。但是，國內現有之資源衛星或航測飛機並無法提供所需之高光譜影像。國外雖已開發可裝設於飛機上的高光譜影像拍攝系統，但由於價格昂貴目前還未引進國內，因此必須自行研發所需的遙感探測系統。

申等(2002)首先研發可架設於高空作業車上之簡易高光譜影像拍攝系統(相片 1)，除可確認設計構想與系統性能外，並可藉以獲取田間必要的高光譜影像，以驗證由地面反射光譜測定所開發的遙測模式，而相關之研發經驗也可提供作爲研發以直昇機爲載具之感測器的基礎，圖 4 爲該系統作業的流程圖。圖 5 顯示簡易高光譜影像拍攝系統架設於高空作業車所得之田間氮營養狀況分佈情形，由圖中影像整體之灰度值分佈，即可以推斷何者所施用之氮肥用量較多，即使對田中以 90 和 135kg N ha^{-1} 處理之高施用量田區也能予以區別。圖中亦清楚顯示因施肥不均一所造成之稻株氮營養空間分佈不均一的情形。此外，由影像分析和以化學分析所得之氮濃度則具有良好的 1:1 對應關係正相關，顯示利用所建立的氮營養遙測模式，配合所研發的簡易高光譜影像拍攝系統確實可以區分田間水稻氮營養狀態的空間分佈情形。

Photo 1. The simplified hyperspectral imaging system operating on a mobile lift.

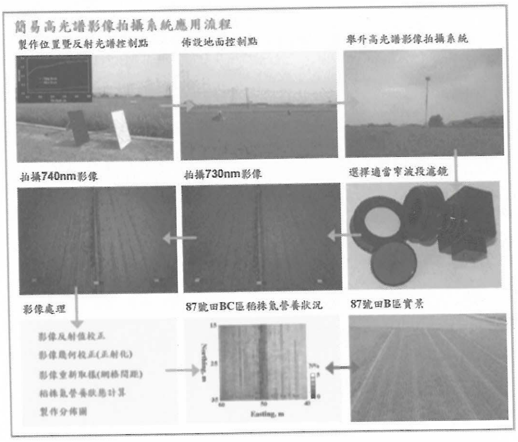

Fig 4. Operation procedures of the simplified hyperspectral imaging system.

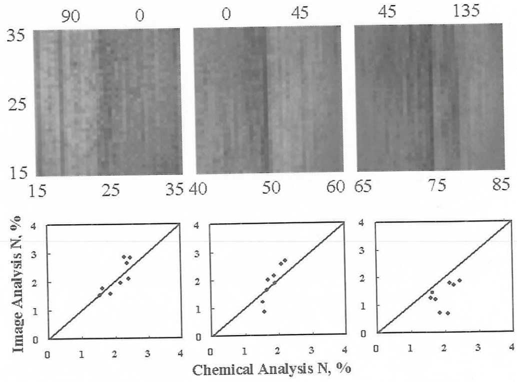

Fig 5. Maps of nitrogen status of rice fields, applied different amount of nitrogen fertilizers, using the simplified hyperspectral imaging system and results of the validation tests.

申等(2003a)又再進一步將該簡易高光譜影像拍攝系統予以改裝，利用直昇機作爲觀測載台，建立具有高機動性和高解析度的機載簡易高光譜遙測系統(相片 2)。圖 6 顯示機載簡易高光譜影像拍攝系統之氮變量試驗區田間氮營養狀況分佈情形，此圖之空間解析度高達 2m。圖 6 不僅顯示出不同氮肥用量小區的位置，亦清楚顯示同一小區中因施肥不均一所造成之稻株氮營養空間分佈不均一的情形。此外，由影像分析和以化學分析所得之氮濃度也具有良好的 1:1 對應關係正相關(圖 7)。以上結果顯示，所研發的機載簡易高光譜影像拍攝系統，配合以往所建立的稻株氮營養遙測模式，確實可以區分田間水稻氮營養狀態的空間分佈情形。應用機載簡易多光譜系統，曾於 2003 年一期作適時進行多次空拍作業，提供多種有關田間水稻生育情形、氮營養狀況、以及產量之空間變異分佈圖，除可被用於作爲田間穗肥精準施用之判斷依據外(申等，2003a)，也可作爲判釋土壤潛藏限制因子的輔助(申等，2003b)。

四、手持式稻株感應器之研發與應用

依照專案計畫之規劃，「水稻栽培與環境精準管理專家決策系統」將依據本研究所提供之田間稻株氮營養空間分佈圖，以及其他相關資訊，做出對應之網格決策圖，再交由「精準農業自動化農機操作系統」實施精準的施肥操作。但由於目前還未發展出實用的穗肥變量施肥機，因此又利用已確定之氮營養遙測模式，另行研發一種手持式的稻株氮營養狀況感應器，作業流程如圖 8 所示，除可用於田間氮營養狀況空間分佈調查外，可與目前的人工穗肥施用作業方式相結合，組成實用的穗肥精準施用系統(相片 3)。

Photo 2. Installing the simplified hyperspectral imaging system on a helicopter.

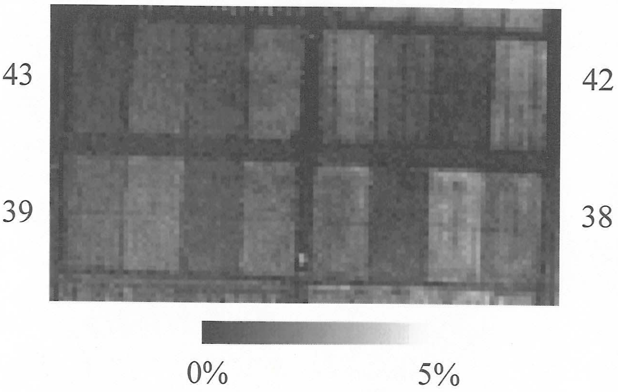

Fig 6. Maps of rice canopy nitrogen content for field plots 38, 39, 42, and 43, using helicopter mounted simplified hyperspectral imaging system

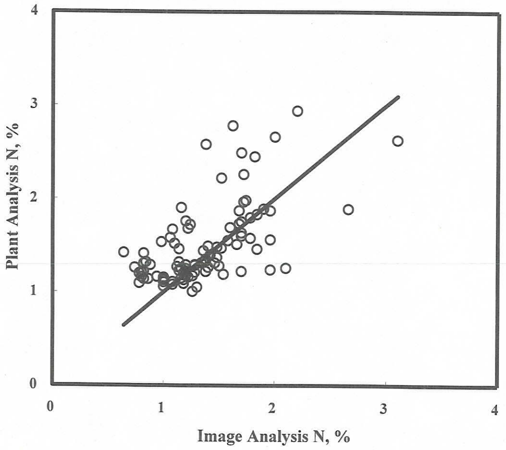

Fig 7. Comparisons of rice plant nitrogen content obtained from image analysis and from plant analysis.

在 2003 年一期作的研究規劃中，雖曾擬於嘉義分所溪口農場進行穗肥精準施用之試驗，以展示該系統對於節省穗肥之功效，然由於本期作氣候適當，田間水稻生長非常旺盛，試驗區內稻株體內之氮營養狀況並未達到可減施或不施穗肥的程度，因而尚無法提供節省穗肥效果之評比資料。

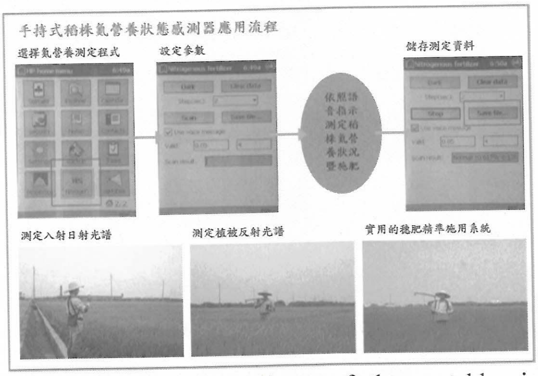

Fig 8. Operation procedures of the portable rice nitrogen status detecting system.

Photo 3. A more practical precision fertilizer application method by combining traditional method with a portable rice nitrogen status detecting system.

五、結語

以上研究成果顯示，進行水稻精準農耕所需之稻株氮營養遙測技術的基本架構，包括遙測模式和感測系統，都已依原定計劃時程成功且完整的發展出來。其中或許仍有改進的空間，但已達到實用的程度，可於進行水稻穗肥精準施用前，適時提供所需之田間稻株氮營養空間分佈圖。

六、誌謝

水稻精準農耕之氮營養遙感探測技術相關研究，承蒙農業委員會編號 89 遙測-4.1-糧-41(4)，農業委員會農業試驗所編號 90 農科-4.1.1-農-C2(05)，91 農科-5.1.3-農-C2(05)與 92 農科-1.1.6-農-C1(03)等計畫經費補助，得以完成順利完成，謹申謝忱。

七、引用文獻

申雍、羅正宗、鄭世朋。2000。稻株氮營養狀況遙測技術之建立。中華農業氣象 7:23-32。

申雍、李裕娟、章國威、羅正宗。2001。水稻氮營養之遙感探測技術。p.235-238。有機肥料與合理化施肥研討會。中華土壤肥料學會，臺中市。

申雍、李裕娟。2002。簡易高光譜影像拍攝系統之研發與應用。p.129-138。應用於水稻精準農業體系之知識與技術。楊純明、林俊義，主編。農委會農業試驗所，臺中縣。

申雍、李裕娟、章國威、姚銘輝。2003a。機載簡易多光譜影像拍攝系統之建構與應用。p.97-104。水稻精準農業體系。楊純明、林俊義，主編。農委會農業試驗所，臺中縣。

申雍、陳仁炫、吳正宗、王鐘和、江志峰、劉禎祺。2003b。應用遙測影像輔助判釋土壤限制因子分佈地區之技術。p.81-88。水稻精準農業體系。楊純明、林俊義，主編。農委會農業試驗所，臺中縣。

李裕娟、張愛華、申雍、章國威、楊純明、羅正宗。2002。稻株氮營養狀態檢測技術。p.101-112。應用於水稻精準農業體系之知識與技術。楊純明、林俊義，主編。農委會農業試驗所，臺中縣。

Remote Sensing Techniques to Determine Nitrogen Status of Rice plants for Precision Management

Y. Shen*[1], Y.J. Lee[2], K.W. Chang[1], J.T. Lo[3], M.H. Yao[4] and J.H. Chen[1]

[1]Department Soil and Environmental Sciences, National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan, ROC

[2] Division of Agronomy, Agricultural Research Institute, COA, Taichung, Taiwan

[3] Division of Agronomy, Chiayi Branch, COA, Chiayi, Taiwan, ROC

[4] Divsion of Agricultural Engineering, ARI, COA, Taichung, Taiwan, ROC

E-mail: yshen@nchu.edu.tw

ABSTRACT

Rice is the major crop in Taiwan. Nitrogen is the most important fertilizer to increase and stabilize yield of paddy rice. However, it is very difficult to identify nitrogen status of rice plants by visual inspection. Remote sensing technique can provide information regarding the spatial distribution of the nitrogen status of rice plants within the field and constitutes the basis of precision management of nitrogen fertilizer. The project is part of the precision cultivation system for rice and is responsible for providing field maps of nitrogen status of paddy rice using remote sensing techniques. During the four years' study, we first identified that $dR/d\lambda|_{735}$ index can distinguish the concentration of nitrogen status within rice plants. Therefore, the index is a much better indicator for delineating nitrogen status of rice plants then indices such as NDVI and SRVI. A remote sensing model based on $dR/d\lambda|_{735}$ was then developed in the second year. Validation tests, performed in the next two years, at Taichung, Chiayi, Taipei and Pintung, indicated that the developed model was neither site specific, nor year and crop season specific. Therefore, the model can serve as the basis for fast determining nitrogen status of rice canopy by remote sensing technique. A simplified hyperspectral imaging system was also developed in the project for acquiring needed field images. The system can be mounted on a mobile lift or on a helicopter based on field operation requirement. Field test indicated that the system is capable of providing the required nitrogen status map for precision application of fertilizer. A hand-held portable instrument was also built by employing the developed nitrogen model. This instrument is capable for measuring the nitrogen status in the field and serves as the basis for precision fertilizer application.

Key words: Rice(*Oryza sativa* L.), Nitrogen, Vegetation index, Hyperspectral image, Bandpass filter, Precision agriculture.